

基于电压递推与 FFRELS 的航空蓄电池 模型参数动态辨识

连 帅, 王 宽, 谷士鹏

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 航空蓄电池作为飞机的主要装备之一, 对安全飞行有非常重要的意义; 为了在试飞过程中方便、准确、及时地掌握电池的特性, 提高试飞安全, 分析了航空蓄电池的二阶 RC 模型特性, 研究了一种二阶 RC 蓄电池模型参数动态辨识方法; 针对蓄电池开路电压测量时, 静置时间过长, 无法实时测量的问题, 创建了蓄电池开路电压辨识递推模型, 实现了开路电压的实时估计; 同时采用基于遗忘因子扩展递推最小二乘法 (FFRELS) 算法对蓄电池模型的部分参数进行辨识; 该方法将 FFRELS 与开路电压递推估计算法相结合能够准确辨识出二阶 RC 蓄电池模型的全部参数, 同时可有效提高蓄电池开路电压的辨识精度; 最后通过实验, 验证了该方法能够准确辨识出蓄电池模型参数, 可为飞机试飞安全监控提供有力保障。

关键词: 等效电路; 最小二乘法; 参数辨识; 递推模型

Dynamic Identification of Battery Model Parameters Based on Voltage Recursion and FFRELS

Lian Shuai, Wang Kuan, Gu Shipeng

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: As one of the important equipments of aircraft, aviation battery plays a very important role in flight test and combat. In order to grasp the characteristics of the battery conveniently and accurately, and to improve the flight test safety during the flight test, this paper analyzes the characteristics of the second-order RC model of the aviation battery and studies a dynamic identification method of the second-order RC battery model parameters. Aiming at the problem that the battery open circuit voltage measurement is too long to be measured in real time, a recursive model of battery open circuit voltage identification is established, real-time estimation of open circuit voltage is realized. At the same time, the parameter identification algorithm based on the forgetting factor extended recursive least squares (FFRELS) algorithm is used to identify some parameters of the second-order RC battery model. This method combines FFRELS with open circuit voltage recursive estimation algorithm to accurately identify all parameters of the second-order RC battery model, and effectively improve the identification accuracy of the battery open circuit voltage. Finally, the experiment proves that the method can accurately identify the battery model parameters and provide a strong guarantee for aircraft flight test safety monitoring.

Keywords: equivalent circuit; least square; parameter identification; recursive model

0 引言

目前, 英、法、美、德等国家的歼击机、直升机甚至大型飞机均使用了大量航空蓄电池; 在我国航空蓄电池作为机载电源^[1]也已在多型飞机上使用。然而为了减轻供电系统自身的重量, 一些军用飞机的应急供电系统只采用蓄电池^[2], 当飞机进入应急工作状态时, 断开其他用电设备, 只向机上关键设备供电, 进而确保飞机安全着陆, 因此全面掌握蓄电池的健康状态就显得尤为重要^[3]。然而电池模型参数辨识是蓄电池特性分析的基础, 也是重难点之一^[4]。

当航空蓄电池充电和放电时, 内部发生非常复杂的化

学反应, 因此其研究模型主要有电化学模型和等效电路模型两种。其中电化学模型主要通过多个高阶微分方程来描述正负电极之间离子的运动过程, 其精度较高, 但模型复杂, 计算量非常大, 仅限于理论研究。等效电路模型通过电阻、电容的组合来描述蓄电池在充放电过程中的非线性特性, 其精度稍低, 但模型简单, 容易实时计算, 因此在实际中被广泛应用。当前常用的模型主要有 Rint 模型、Thevenin 模型和 RC 模型。Rint 模型由理想电压源和内部内阻组成, 是最简单的等效电路模型, 其只适合于简单的电路仿真, 无法进行工程应用。Thevenin 模型在 Rint 模型的基础上考虑了蓄电池内部的极化现象, 其能够很好的表现蓄电池的动静态特性, 能够比较精确的模拟电池的充放电行为, 而且结构不是很复杂, 因此在动力电池中该模型使用比较广泛。RC 模型兼顾了模型性能与模型结构复杂度的要求, 其精度高而且具有很好的可扩展性, 因此是航空

收稿日期: 2019-07-02; 修回日期: 2019-07-20。

基金项目: 国家自然科学基金(41174162)。

作者简介: 连 帅(1984-), 男, 陕西人, 工学硕士, 主要从事飞行试验测试方向的研究。

电池的首选模型。

目前, 航空蓄电池模型的参数识别主要包括: 脉冲实验法、卡尔曼滤波法及最小二乘法。脉冲实验方法需要长时间静置电池才能再次测量, 这不适合在线识别^[5]; 卡尔曼滤波法的计算量过大, 影响在线辨识的实时性^[6]; 最小二乘法由于其计算量小, 辨识精度高而被广泛使用^[7]。然而随着数据计算量的增加, 最小二乘法很容易出现“数据饱和”的问题^[8], 因此本文提出了基于遗忘因子扩展递推最小二乘法对电池的模型参数进行识别。同时, 开路电压 (open circuit voltage, OCV) 是模型中一个非常重要的参数, 但其通常需要静置六个小时左右才能准确测量; 文献 [9] 将开路电压与模型参数的非线性表达式作为一个新参数进行整体辨识, 但其无法估计出各个时刻的开路电压, 基于此本文提出了电池开路电压递推模型, 用以估计电池的开路电压, 实现电池模型参数的动态准确辨识。最后通过实验, 验证了该算法能够准确辨识出模型的参数。

1 航空蓄电池 RC 模型

RC 模型能够直观地表示蓄电池的动态、静态特性。然而 RC 阶数越多, 模型的性能越高, 但模型的计算越复杂。仿真实验表明, 二阶 RC 网络以上的模型误差变化不大, 但是模型的复杂程度却大大增加^[4]。二阶 RC 等效电路如图 1 所示。

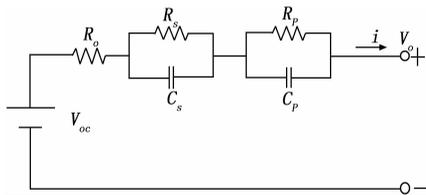


图 1 二阶 RC 等效电路模型

图中 V_{oc} 为蓄电池的开路电压, 电阻 R_o 为蓄电池的内阻, R_s 、 C_s 并联组成的网络用来表示电池的电化学极化特性, R_p 、 C_p 并联组成的网络用来表示电池的浓差极化特性, 两个 RC 网络的电压之和为蓄电池的极化电压。

蓄电池的等效放电电路如图 2 所示。图中 R_L 为负载电阻, K 为放电控制开关。航空蓄电池实际放电电压变化曲线如图 3 所示。

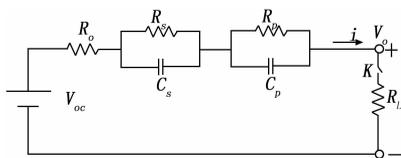


图 2 等效放电电路

若开关 K 未闭合时, 蓄电池的开路电压为:

$$V_o = V_{oc} \quad (1)$$

开关 K 闭合后电池进入放电状态, 则端电压即为负载为 R_L 上的电压:

$$u(t) = -i(t)R_L \quad (2)$$

电路中的电流 $i(t)$ 的表达式为:

$$i(t) = \frac{-V_{oc}}{R_o + R_s + R_p + R_L} \left(1 + \frac{R_s}{R_o + R_L} e^{\frac{-t}{r_s}} + \frac{R_p}{R_o + R_L} e^{\frac{-t}{r_p}} \right) \quad (3)$$

式中, r_s 和 r_p 为时间常数, 其表达是分别为:

$$r_s = C_s \frac{R_s(R_o + R_L)}{R_o + R_s + R_L}, r_p = C_p \frac{R_p(R_o + R_L)}{R_o + R_p + R_L}$$

则蓄电池端电压 $u(t)$ 的表达式为:

$$u(t) = \frac{-V_{oc} R_L}{R_o + R_s + R_p + R_L} \left(1 + \frac{R_s}{R_o + R_L} e^{\frac{-t}{r_s}} + \frac{R_p}{R_o + R_L} e^{\frac{-t}{r_p}} \right) \quad (4)$$

当 $t=0^-$ 时, $u(t)$ 为开路电压 V_{oc} , $t=0^+$ 时, $u(t)$ 的值为:

$$U(0^+) = \frac{R_o V_{oc}}{R_o + R_L} \quad (5)$$

所以在开关闭合瞬间, 电池的端电压会发生突变, 如图 3 中 AB 段所示; 随着 t 的增大, $u(t)$ 逐渐减小, 在 $t < 4r_s$ 的时间段内, $u(t)$ 减小的速度比较快, 如图 3 中 BC 段所示, 在 $t > 4r_s$ 之后, $u(t)$ 减小的速度比较慢, 如图 3 中 C 点之后所示。可见, 该二阶 RC 等效电路可以很好的描述航空蓄电池的特性。

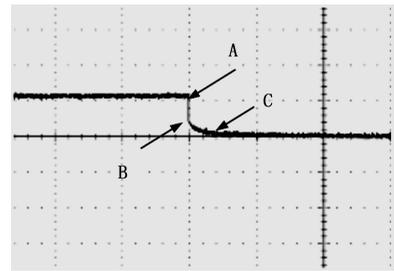


图 3 蓄电池实际放电电压曲线

2 参数辨识

2.1 蓄电池模型参数辨识应用

在飞行试验中, 为了实现电池特性参数的安全监测, 需要识别模型的参数, 其具体过程如图 3 所示。

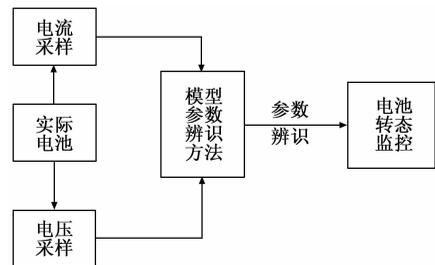


图 3 航空蓄电池模型参数辨识过程

系统首先建立图 1 所示的航空蓄电池二阶 RC 模型, 然后对蓄电池的端电压、输出电流进行实时采样, 将采样电压和电流应用于模型参数辨识方法, 辨识出模型参数, 通过辨识出的模型参数对蓄电池的安全状态进行估计。

2.2 最小二乘参数辨识基本原理

最小二乘法是一种非常有效的参数辨识方法，它不仅简单而且容易理解，同时对所要识别的系统没有限制，即不论系统是线性的还是非线性的、是动态的还是静态的、是连续的还是离散的都可以应用最小二乘法对其进行参数辨识。

假设系统的离散传递函数为：

$$G(z^{-1}) = \frac{Y(z^{-1})}{X(z^{-1})} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (6)$$

则该系统对应的差分方程为：

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - \dots - a_n y(k-n) + b_0 x(k) + b_1 x(k-1) + \dots + b_n x(k-n) + e(k) = -\sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^n b_i x(k-i) + e(k) \quad (7)$$

式中， $y(k)$ ， $y(k-1)$ ， $y(k-2)$ ， \dots ， $y(k-n)$ 为系统的输出； $x(k)$ ， $x(k-1)$ ， \dots ， $x(k-n)$ 为系统的输入； $e(k)$ 为差分方程的误差。

令：

$$\varphi(k) = [-y(k-1) \quad -y(k-2) \quad \dots \quad -y(k-n) \quad x(k) \quad x(k-1) \quad \dots \quad x(k-n)]^T$$

$$\theta = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n \quad b_0 \quad b_1 \quad \dots]^T$$

则式 (7) 可以改写成最小二乘的形式：

$$y(k) = \varphi(k)^T \theta + e(k) \quad (8)$$

如果分别测出 $n+N$ 个输入输出值，则可以得到最小二乘的形式为：

$$Y = \Phi \theta + e \quad (9)$$

式中：

$$Y = [y(n+1) \quad y(n+2) \quad \dots \quad y(n+N)]^T$$

$$e = [e(n+1) \quad e(n+2) \quad \dots \quad e(n+N)]^T$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} y(n) & -y(n-1) & \dots & -y(1) \\ -y(n+1) & -y(n) & \dots & -y(2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -y(n+N) & -y(n+N-1) & \dots & -y(N) \\ u(n) & \dots & u(1)u(n+1) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ u(n+N) & \dots & u(N) \end{bmatrix}$$

则得到泛函 $J(\theta)$ 为：

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^N (Y - \Phi \theta)^2 = \sum_{i=1}^N e^2(n+i) = (Y - \Phi \theta)^T (Y - \Phi \theta) \quad (10)$$

最小二乘法估计要求残差的平方和最小，因此对该泛函求极值可得：

$$\frac{\partial J}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} [(Y - \Phi \theta)^T (Y - \Phi \theta)] = 0 \quad (11)$$

对式 11) 方程求解，可得到该系统的最小二乘估计值：

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (12)$$

式 (12) 即为该系统的最小二乘参数估计值，可见最小二乘法可以一次性求出所有参数的估计值，其优点是估计的

精度高，但是算法要求矩阵求逆运算，对处理器的空间要求相对较大，且很容易形成病态的方程式，对于实际系统来说，通过一次最小二乘辨识得到的参数估计值很难接近真实值，因此往往需要采用递推最小二乘法来对参数进行估计。然而递推最小二乘法随着迭代步数的增加，旧的数据会越来越来多，导致新的数据难以被带入迭代中，为了避免这种情况的发生，可以引入遗忘因子 λ ，含遗忘因子的递推最小二乘法公式为：

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + K(k+1)(y(k+1) - \Phi^T(k+1)\hat{\theta}(k)) \quad (13)$$

$$K(k+1) = \frac{P(k)\Phi(k+1)}{\lambda + \Phi^T(k+1)P(k)\Phi(k+1)} \quad (14)$$

$$P(k+1) = \frac{1}{\lambda} \left(P(k) - \frac{P(k)\Phi(k+1)\Phi^T(k+1)P(k)}{1 + \Phi^T(k+1)P(k)\Phi(k+1)} \right) \quad (15)$$

式中， λ 为遗忘因子，其取值范围应该为 $0 < \lambda < 1$ ，一般取 $0.95 < \lambda < 1$ ， λ 越小，算法的跟踪能力越强，但是同时，数据的波动也越大。

2.3 蓄电池模型分析

根据二阶 RC 等效电路模型的工作原理，结合 Kirchhoff 定理，可以建立航空蓄电池模型的状态空间方程如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{SOC} \\ \dot{v}_s \\ \dot{v}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_p C_p} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_p C_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC \\ v_s \\ v_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{QN} \\ \frac{1}{C_s} \\ \frac{1}{C_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}$$

$$V_o = V_\alpha + R_o i + v_s + v_p \quad (16)$$

因此模型中需要辨识的参数为 $[R_o \quad R_s \quad C_o \quad R_p \quad C_p \quad V_\alpha]$ 。

将式 (16) 经过拉普拉斯变换，可得到其输入输出函数为：

$$\frac{U(s) - V_\alpha(s)}{I(s)} = \left[R_o s^2 + \left(\frac{R_o}{R_s C_s} + \frac{R_o}{R_p C_p} + \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_p} \right) s + \left(\frac{R_o}{R_s C_s R_p C_p} + \frac{1}{C_s R_p C_p} + \frac{1}{C_p R_s C_s} \right) \right] / \left[s^2 + \left(\frac{1}{R_s C_s} + \frac{1}{R_p C_p} \right) s + \frac{1}{R_s C_s R_p C_p} \right] \quad (17)$$

对式 (17) 进行 z 变换，采用双线性变换 $s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}$ (T 为采样时间) 可以得到系统的离散传递函数为：

$$\frac{U(z^{-1}) - V_\alpha(z^{-1})}{I(z^{-1})} = \frac{c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (18)$$

式中， $[a_1 \quad a_2 \quad c_0 \quad c_1 \quad c_2]$ 分别为：

$$a_1 = \frac{2T^2 - 8R_s C_s R_p C_p}{4R_s C_s R_p C_p + 2TR_p C_p + 2TR_s C_s + T^2} \quad (19)$$

$$a_2 = \frac{4R_s C_s R_p C_p - 2TR_p C_p - 2TR_s C_s + T^2}{4R_s C_s R_p C_p + 2TR_p C_p + 2TR_s C_s + T^2} \quad (20)$$

$$c_0 = \frac{4R_s C_s R_p C_p + 2TR_0 R_p C_p + 2TR_0 R_s C_s + 2TR_s R_p C_p + 2TR_p R_s C_s + R_0 T^2 + R_0 T^2 + R_s T^2}{4R_s C_s R_p C_p + 2TR_p C_p + 2TR_s C_s + T^2} \quad (21)$$

$$c_1 = \frac{2R_0 T^2 + 2R_s T^2 + 2R_p T^2 - 8R_0 R_s C_s R_p C_p}{4R_s C_s R_p C_p + 2TR_p C_p + 2TR_s C_s + T^2} \quad (22)$$

$$c_2 = \frac{4R_s C_s R_p C_p - 2TR_0 R_p C_p - 2TR_0 R_s C_s - 2TR_s R_p C_p - 2TR_p R_s C_s + R_0 T^2 + R_s T^2 + R_p T^2}{4R_s C_s R_p C_p + 2TR_p C_p + 2TR_s C_s + T^2} \quad (23)$$

根据式 (3) 可以得到该系统的差分方程为:

$$U(k) = -a_1 U(k-1) - a_2 U(k-2) + c_0 I(k) + c_1 I(k-1) + c_2 I(k-2) + (V_\alpha(k) + a_1 V_\alpha(k-1) + a_2 V_\alpha(k-2)) \quad (24)$$

式中, $U(k)$ 为 k 时刻蓄电池的端电压; $I(k)$ 为 k 时刻蓄电池的输出电流; $V_\alpha(k)$ 为 k 时刻蓄电池的开路电压。

由式 (24) 可知, 只要测得连续 3 个蓄电池的时刻端电压、输出电流和开路电压即可采用参数辨识算法得到式 (24) 中的系数, 然后根据式 (19)——式 (23) 可得到蓄电池模型的参数。

然而, 式 (24) 中 V_α 为开路电压, 其值并不能被测量, 大部分文献都是通过离线建立 OCV-SOC 的关系表, 然后根据当前的 SOC 值, 通过查表得到当前时刻的蓄电池开路电压, 然而蓄电池在使用老化过程中 OCV-SOC 的关系会发生变化, 因此随着蓄电池的老化, 这种方法将不再适用, 因此本文提出了开路电压递推模型, 对蓄电池各个采样时刻的开路电压进行辨识估计。

2.4 电池开路电压递推模型

由于开路电压受电池的荷电状态、温度、寿命等因素影响, 且在采样时刻内其影响因素可以忽略, 因此可将式 (24) 中所有包含开路电压的非线性关系式看做一个参数 $L(k)$ 进行整体辨识^[9], 如式 (25) 所示。

$$L(k) = V_\alpha(k) + a_1 V_\alpha(k-1) + a_2 V_\alpha(k-2) \quad (25)$$

因此可形成式 (26) 所示的系统差分方程:

$$U(k) = L(k) - a_1 U(k-1) - a_2 U(k-2) + c_0 I(k) + c_1 I(k-1) + c_2 I(k-2) \quad (26)$$

对式 (26) 应用 FFRELS 算法进行参数辨识, 可以得到 $[L(k) \ a_1 \ a_2 \ c_0 \ c_1 \ c_2]$ 的值, 然后将辨识出的参数带入式 (27) 所示的电压递推模型中, 可估计出电池的开路电压。

$$V_\alpha(k) = L(k) - a_1 V_\alpha(k-1) - a_2 V_\alpha(k-2) \quad (27)$$

2.5 蓄电池模型参数辨识算法

将式 (26) 整理为最小二乘的形式, 为:

$$y(k) = \Phi(k)^T \theta \quad (28)$$

式中:

$$y(k) = U(k)$$

$$\Phi(k)^T = [1, -U(k-1), -U(k-2), I(k), I(k-1), I(k-2)]$$

$$\theta = [L(k), a_1, a_2, c_0, c_1, c_2]$$

式中, $y(k)$ 为最小二乘算法的输出量, 即为蓄电池的端电压; $\Phi(k)$ 为最小二乘辨识过程的输入, θ 为所要辨识的参数。

当参数 $[L(k), a_1, a_2, c_0, c_1, c_2]$ 辨识出来之后,

根据式 (12) 通过递推可以得到系统的开路电压 V_α 。同时通过对式 (4) ~ (8) 求解可以得到。

$$R_0 = -\frac{c_0 + c_2 - c_1}{1 + a_2 - a_1} \quad (29)$$

$$R_s C_s R_p R_p = \frac{T^2(1 - a_1 + a_2)}{4(1 + a_1 + a_2)} \quad (30)$$

$$R_s C_s + R_p C_p = \frac{T(1 - a_2)}{1 + a_1 + a_2} \quad (31)$$

$$R_0 + R_s + R_p = \frac{c_0 + c_1 + c_2}{1 + a_1 + a_2} \quad (32)$$

$$R_0 R_p C_p + R_0 R_s C_s + R_s R_p C_p + R_p R_s C_s = \frac{T(c_0 - c_2)}{1 + a_1 + a_2} \quad (33)$$

通过对上式进行求解可以得到参数 $[R_0 \ R_s \ C_s \ R_p \ C_p]$ 。

针对本文所提出的蓄电池模型, 采用参数辨识方法的具体步骤如下所示:

Step1、确定初始化参数: 采样周期 T , $\hat{\theta}(0)$ 、 $P(0)$ 、 $V_\alpha(0)$ 及遗传因子 λ ;

Step2、确定输入数据: 根据传感器采集到的第 k 时刻的蓄电池的端电压和电流, 来确定参数辨识所需要的数据矩阵 $\Phi(k)$;

Step3、计算系数: 根据式 (26) 所示的带遗传因子的递推最小二乘公式来计算出第 k 时刻的系数 $[L(k), a_1, a_2, c_0, c_1, c_2]$;

Step4、计算开路电压: 根据式 (27) 递推计算出第 k 时刻的开路电压;

Step5、根据参数计算公式 (29) ~ (33), 得到第 k 时刻的模型参数 $[R_0 \ R_s \ C_s \ R_p \ C_p]$;

Step6、获取第 $k+1$ 时刻的数据, 重复 Step2~Step5 来得到第 $k+1$ 时刻的模型参数, 依次递推来实现电池模型参数的在线估计。

3 实验结果与分析

为了验证本文所提出的参数识别方法的可靠性和精确性, 搭建了图 2 所示的实验平台。实验选用 12V12Ah 的风帆铅酸蓄电池, 其电池开路电压 $V_\alpha = 13.1 \text{ V}$, 内阻 $R_e = 0.05 \ \Omega$, 极化内阻 $R_s = 0.035 \ \Omega$, 极化电容 $C_s = 800 \text{ F}$, 极化内阻 $R_p = 0.02 \ \Omega$, 极化电容 $C_p = 10 \text{ F}$ 。

该平台以 6A 的电流对蓄电池进行脉冲放电, 采集到的放电过程中蓄电池的电流和端电压变化曲线如图 3、4 所示。

按照 3.3 节中的参数辨识步骤对模型参数辨识, 辨识



图 2 实验平台

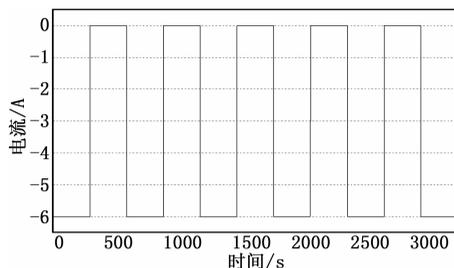


图 3 蓄电池放电电流

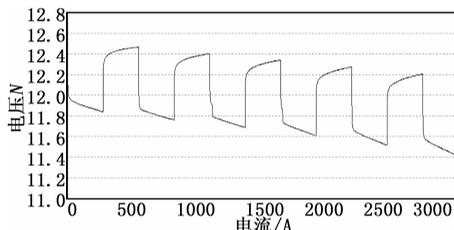


图 4 蓄电池放电端电压

结果如表 1 所示。

表 1 仿真模型参数辨识结果

参数	真值	辨识值	误差/%
R_o/Ω	0.05	0.0552	10.4
R_s/Ω	0.035	0.0342	2.28
C_s/F	800	826.47	3.3
R_p/Ω	0.02	0.023	15
C_p/F	10	11.02	10.2

由表 1 的数据可知，所得到的参数辨识结果其误差都在 11% 以内，可见其辨识方法精度比较高。

同时将辨识出的开路电压与文献 [9] 中采用的方法进行对比，结果如图 5 所示。

由图 5 可知，本文方法辨识出的开路电压明显优于文献 [9] 的结果。其两种方法的估计误差如图 6 所示，可见本文的误差小于 0.5%，其值明显小于文献 [9] 的误差。因此本文所提出的参数辨识方法能够很好的对航空蓄电池的模型参数进行辨识。

可见，本文提出的方法能够准确辨识出二阶 RC 航空蓄电池模型的参数，辨识精度高。

4 结论

分析了二阶航空电池模型的输出特性，提出了具有遗

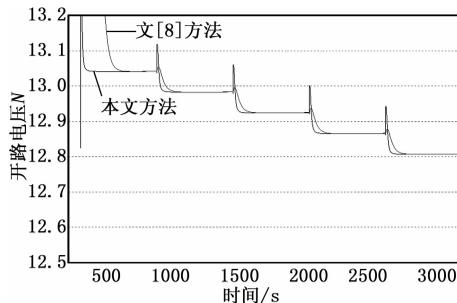


图 5 开路电压辨识结果

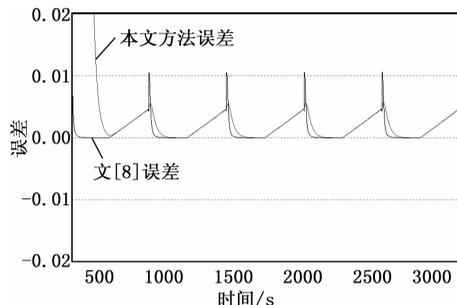


图 6 开路电压辨识误差

忘因子扩展递推最小二乘法的参数辨识算法，该算法继承了遗忘因子递推最小二乘法和递推扩展最小二乘法的优点，解决了数据的饱和问题，能够对模型参数进行准确辨识；同时采用开路电压递推模型对电池的开路电压进行估计，最后通过实验表明，该方法能够准确地对蓄电池的模型参数进行辨识，可实现蓄电池特性的安全监控，可为后续航空电池的健康状态管理提供有力的支持。

参考文献:

- [1] 庞辉. 基于扩展单粒子模型的锂离子电池参数辨识策略 [J]. 物理学报, 2018 (05): 259-269.
- [2] 何耀, 曹成荣, 等. 基于可变温度模型的锂电池 SOC 估计方法 [J]. 电机与控制学报 2018 (22) 1: 43-52.
- [3] 唐骏宇, 冯长江. 基于特征分解谱估计的蓄电池内阻检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (06), 37-40.
- [4] 邓磊, 李小谦, 等. 基于改进 PNGV 模型的动力电池 SOC 精确估计 [J]. 电源技术, 2017, 41 (10): 1461-1463, 1478.
- [5] 朱雅俊. 电动汽车用磷酸铁锂电池建模与 SOC 估算研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [6] 司伟, 冯长江, 黄天辰. 基于内阻法修正的蓄电池卡尔曼滤波 SOC 估算 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (12), 185-189.
- [7] 梁奇, 于春梅, 等. 航空钴酸锂电池的温度特性研究 [J]. 电源技术, 2017 41 (9): 1278-1280, 1295.
- [8] 胡晓敏, 王顺利, 等. 航空用动力电池工作特性分析 [J]. 电源技术, 2016 40 (8): 1554-1555, 1569.
- [9] 张彦琴, 郭凯, 刘汉雨. 铅酸电池模型及参数辨识研究 [J]. 蓄电池, 2013, 50 (3): 140-144.